


УДК 624.138:624.131.4

*Научная статья*

https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-3-17-30



# Определение модуля деформации закрепленного грунтового основания по данным штамповых испытаний и геотехнического мониторинга

**А.Ю. Прокопов** , **И.В. Сычев** , **А.В. Рязанцева** 

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ prokopov72@rambler.ru

**Аннотация**

***Введение.*** Широко распространенные на Юге России просадочные грунты создают ряд проблем и опасностей, связанных с высокой вероятностью возникновения просадок оснований фундаментов в случае превышения начальной просадочной влажности и начального просадочного давления. Учет данного фактора очень важен на всех стадиях жизненного цикла здания или сооружения, особенно на этапе проектирования, когда должны быть разработаны научно обоснованные конструктивные и технологические решения, обеспечивающие надежную эксплуатацию объектов в рассматриваемых сложных инженерно-геологических условиях.

В настоящей статье выполнен анализ действующих федеральных и территориальных нормативно-технических документов в области проектирования зданий и сооружений на просадочных грунтах; на основе численного эксперимента показана некорректность результатов, получаемых в ряде случаев по нормативным методикам; предложен новый метод расчета, основанный на определении модуля деформации закрепленного грунтового основания по данным штамповых испытаний и геотехнического мониторинга.

***Материалы и методы***. В исследовании проводились:

– анализ существующих подходов и методов к проектированию оснований и фундаментов в условиях просадочных грунтов;

– численные эксперименты, включающие расчеты по нормативным методикам с вариацией исходных данных как по начальным характеристикам грунтов, так и по технологическим параметрам закрепления, и статистическую обработку их результатов;

– анализ результатов ранее выполнявшегося авторами геотехнического мониторинга зданий, построенных на закрепленных грунтах, и экспериментальных исследований деформационных свойств с применением запатентованного устройства;

– определение основных факторов, влияющих на проектные решения по усилению грунтового основания и фундаментов здания, воспринимающих сложный комплекс эксплуатационных нагрузок и установление новой зависимости модуля деформации закрепленного грунта от его начального модуля деформации и процента армирования.

***Результаты исследования***. Установлено, что существующие методики расчета закрепленных оснований не обеспечивают достаточную точность для определения прогнозируемых осадок зданий и сооружений, и полученные расчетные значения не всегда соответствуют фактически возникающим деформациям оснований и фундаментов. Установлена зависимость модуля деформации закрепленного грунтового основания от начального модуля деформации грунта и процента его армирования цементно-песчаным раствором. Разработан новый метод расчета, основанный на определении модуля деформации закрепленного грунтового основания по данным штамповых испытаний с применением запатентованного устройства и геотехнического мониторинга.

***Обсуждение и заключение.*** Установлено, что модуль деформации закрепленного методом цементации грунтового массива нелинейно зависит от процента армирования грунта цементно-песчаным раствором и начального модуля деформации грунта, при этом указанная зависимость описывается уравнением поверхности второго порядка общего вида. Рекомендовано использовать полученные зависимости при проектировании технологических параметров закрепления в условиях просадочных грунтов Ростовской области.

**Ключевые слова:** просадочные грунты, усиление грунтов, фундаменты, штамповые испытания, геотехнический мониторинг

**Для цитирования.** Прокопов А.Ю. Сычев И.В., Рязанцева А.В. Определение модуля деформации закрепленного грунтового основания по данным штамповых испытаний и геотехнического мониторинга. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2023;2(3):17–30. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-3-17-30

*Original article*

# Determining the Stabilised Subfoudation Soil Deformation Modulus According to the Plate Load Tests and Geotechnical Monitoring Data

**Albert Yu. Prokopov**, **Ilya V. Sychev**, **Anastasiya V. Ryazantseva**

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ prokopov72@rambler.ru

**Abstract**

***Introduction.*** The subsiding soils, which are widely spread in the south of Russia, create a number of problems and hazards due to the high probability of subfoundations subsidence in case of exceeding the values of initial soil moisture and initial pressure for subsidence. This is an important phenomenon to be considered at all life cycle stages of a building or structure, especially at the stage of design, when the scientifically justified design and technological solutions must be developed to ensure the reliable operation of facilities in the complicated engineering and geological conditions being studied hereby. The present article analyses the acting federal and regional regulatory and technical documentation in the field of buildings and structures design on the subsiding soils. Based on the numerical experiment, the incorrectness of the results sometimes received upon following the normative methodology is shown. A new calculating methodology based on determining the stabilised subfoudation soil deformation modulus according to the plate load tests and geotechnical monitoring data is proposed.

***Materials and Methods*.**The research comprised:

– analysis of the existing approaches and methodologies for the subfoundations and foundations design on the subsiding soils;

– numerical experiments, including calculations according to the normative methodology, which implied variation of the original data of both the initial properties of soils and technological parameters of stabilisation, as well as statistical processing of the results;

– analysis of the carried out earlier by the authors geotechnical monitoring results of the buildings built on the stabilised soils and experimental study of the deformation properties using a patented device;

– determining the main factors having influence on the design solutions for the subfoudation soils and building foundations strengthening under a complicated set of operational loads and establishing a new dependence of the stabilised soil deformation modulus on the initial soil deformation modulus and percentage of soil reinforcement.

***Research results.*** It has been established that the existing methodologies for calculating the stabilised subfoudation soils are not enough precise for determining the forecastable subsidence of buildings and structures, and the obtained design values do not always correspond to the factual deformations of subfoundations and foundations. The dependence of the stabilised subfoudation soil deformation modulus on the initial soil deformation modulus and percentage of soil reinforcement with the cement-sand mortar has been traced. A new calculating methodology has been developed based on determining the stabilised subgrade soil deformation modulus according to the data of the plate load tests using a patented device and geotechnical monitoring.

***Discussion and conclusion.*** It has been established that the deformation modulus of the soil mass stabilised by the cementation method depends non-linearly on percentage of soil reinforcement with the cement-sand mortar and the initial soil deformation modulus, and this dependence is described by a second-order surface equation of a general form. It is recommended to apply the discovered dependencies for designing the technological parameters of the subsiding soils stabilisation in the Rostov region conditions.

**Key words:** subsiding soils, soil strengthening, foundations, plate load tests, geotechnical monitoring

**For citation.** Prokopov AYu, Sychev IV, Ryazantseva AV. Determining the Stabilised Subfoudation Soil Deformation Modulus According to the Plate Load Tests and Geotechnical Monitoring Data. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2023;2(3):17–30. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-3-17-30

**Введение.** При проектировании, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений на просадочных грунтах одной из главных проблем является обеспечение эксплуатационной надежности и безопасности объектов при природном и техногенном подтоплении или затоплении. Если грунты основания обладают просадочными свойствами, то при достижении определенной влажности возникают просадочные явления, которые зачастую вызывают неравномерные вертикальные деформации фундаментов и наземных несущих конструкций. Это приводит к существенным нарушениям строительных конструкций вплоть до потери устойчивости здания или сооружения. Во избежание таких последствий современные нормативные документы требуют обязательного проведения мероприятий по снижению или полной ликвидации просадочных свойств грунтов основания. Одним из наиболее эффективных методов устранения просадочных свойств грунтов, получивших распространение в Ростовской области и других регионах Юга России, является метод цементации грунтов, основанный на инъекционном нагнетании через пробуренные скважины цементных или цементно-песчаных растворов. Основной проблемой, ограничивающей применение указанного метода, является сложность и недостаточная точность существующих методов контроля качества закрепления грунтов, а также недостатки известных методов расчета и проектирования закрепленных оснований, которые зачастую приводят к получению завышенных деформационных характеристик закрепленных грунтов и не позволяют адекватно спрогнозировать расчетные осадки фундаментов.

Теоретические расчеты модуля деформации грунтов и осадки основания по действующим нормативным документам, включая территориальные строительные нормы, зачастую не подтверждаются результатами геотехнического мониторинга с замерами фактических осадок, которые в строительной практике Ростовской области могут в разы превышать расчетные значения. Наиболее точные результаты измерения деформационных характеристик грунтового основания, включая их просадочные свойства, достигаются полевыми испытаниями, среди которых следует выделить испытания грунтов штампами. Подтверждение расчетной осадки грунтов после их закрепления впоследствии также должно осуществляться инструментальными методами, включая геодезические измерения вертикальных и горизонтальных перемещений контрольных точек.

Таким образом, обоснование технологических параметров армирования просадочных грунтов на основании анализа данных штамповых испытаний и геотехнического мониторинга является актуальной научно-технической задачей в области технологии строительного производства и геотехники.

Целью работы является установление закономерностей изменения деформационных характеристик грунтовых массивов в процессе закрепления для разработки эффективных технологических параметров армирования грунтов цементно-песчаными растворами.

Идея работы заключается в том, что технологические параметры армирования грунтов цементно-песчаным раствором определяются для достижения требуемых деформационных характеристик закрепленного массива, рассчитанных с учетом закономерностей, установленных по результатам штамповых испытаний и геотехнического мониторинга на подобных объектах.

Фундаментальными исследованиями свойств лессовых просадочных грунтов, прогнозированием их поведения при различных природных и техногенных воздействиях и связанными с этим геологическими рисками занимались известные ученые Института геоэкологии РАН: Сергеев Е.М., Осипов В.И. [1–3] и др.; МГУ им. М.В. Ломоносова: Трофимов В.Т. [4], Соколов В.Н. и др.; РИСИ-РГСУ-ДГТУ: Ананьев В.П. [5, 6], Воляник Н.В., Приходченко О.Е. и др.

Проблемам проектирования, строительства и эксплуатации зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических условиях, в т. ч. на структурно-неустойчивых грунтах, посвящены труды ученых:

– СПбГАСУ: Мангушева Р.А. [7], Осокина А.И. [7] и др.;

– МГСУ: Абелева М.Ю., Тер-Мартиросяна З.Г., Евтушенко С.И. и др.;

– НИЦ «Строительство», в т. ч. НИИОСП им. Н.М. Герсеванова: Ильичева В.А., Сорочана Е.А., Крутова В.И., Колыбина И.В., Коновалова П.А. и др.;

– КубГАУ: Шадунца К.Ш., Полищука А.И. и др.;

– СКФУ: Галай Б.Ф. [8] и др.;

– ВолГТУ: Пшеничкиной В.А., Олянского Ю.И., Богомолова А.И. и др.;

– ЮРГПУ(НПИ) им. М.И. Платова: Мурзенко Ю.Н., Скибина Г.М., Дыба В.П., Субботина А.И. и др.;

– ДГТУ: Черкасова С.М. [9], Должикова П.Н. [10], Гридневского А.В., Акопяна В.Ф. [10, 11], Акопяна А.Ф. [10, 11], Таржиманова М.А., Жура В.Н. [12–15], Белаша В.В. [16], Фоменко Л.Н. [17], а также авторов настоящей статьи [10, 13–15, 18, 19] и др. ученых.

Проектирование и строительство зданий и сооружений в условиях просадочных грунтов Ростовской области, включая разработку проектов усиления грунтовых оснований различными методами, в настоящее время осуществляется на основании рекомендаций и требований следующих федеральных и территориальных нормативно-технических документов:

– СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85*;

– СП 21.13330.2012 Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.01.09–91;

– СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83;

– СП 24.13330.2011 Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03–85;

– СП 45.13330.2017 Земляные сооружения, основания и фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 3.02.01–87;

– СП 116.13330.2012 Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02–2003;

– СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01–99*;

– СП 50-101–2004 Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений;

– СП 291.1325800.2017 Конструкции грунтоцементные армированные. Правила проектирования;

– ГОСТ Р 59706–2022. Грунты химически закрепленные. Технические условия;

– ГОСТ Р 59538–2021. Растворы инъекционные для закрепления грунтов на основе цемента. Технические условия;

– ГОСТ Р 59705–2021. Растворы инъекционные для закрепления грунтов на основе силиката натрия. Технические условия;

– Методическое пособие по укреплению грунтов методами струйной цементации, глубинным перемешиванием, инъекции растворами на основе микроцементов, манжетной инъекцией в режиме гидроразрывов.

– ТСН-50-306–2005 Ростовской области. Основания и фундаменты повышенной несущей способности и др.

Задачами настоящей статьи являются: критический анализ нормативных требований и рекомендаций по расчету деформационных характеристик закрепленного грунтового основания, в т. ч. разработанных применительно к условиям просадочных грунтов Ростовской области (ТСН-50-306–2005); выявление недостатков применяемых подходов и несоответствий расчетных значений деформационных характеристик фактически зафиксированным в практике строительства в г. Ростове-на-Дону и Ростовской области, а также разработка нового метода оценки модуля деформации закрепленного основания и контроля качества работ по закреплению на его основе.

**Материалы и методы.** Для сравнительного анализа приняты следующие методики расчета деформационных характеристик закрепленного грунтового основания:

1) Методика ТСН-50-306–2005 Ростовской области. Основания и фундаменты повышенной несущей способности с использованием минимальных рекомендованных значений модуля деформации по Приложению Ж;

2) Методика ТСН-50-306–2005 с использованием минимально допустимых значений модуля деформации по ГОСТ Р 59706–2022;

3) Авторская методика, разработанная на основании штамповых испытаний и геотехнического мониторинга на объектах строительства в г. Ростове-на-Дону и г. Волгодонске [19].

Методика 1. При разработке проектов закрепления просадочных грунтов в Ростовской области проектировщики, как правило, применяют метод расчета по ТСН-50-306–2005, основанный на определении необходимой для обеспечения несущей способности степени (процента) армирования $A$, %, грунтового основания и расчете на его основе средневзвешенного модуля деформации $E_{ср.взв}$. Иногда процент армирования $A$ задают без расчетного обоснования, исходя из обеспечения допустимой осадки при достижении закрепленным основанием определенного теоретического значения $E_{ср.взв}$:

$$E_{ср.взв} = \frac{E_г F_г + E_{эл} F_{эл}}{F},$$

где $F$ — площадь расчетной ячейки под подошвой фундамента, м$^2$; $F_г$, $F_{эл}$ — соответственно площадь грунта и цементогрунтового элемента в расчетной ячейке, м$^2$; $E_г$, $E_{эл}$ — соответственно средний модуль деформации грунта и цементогрунтового элемента, МПа.

Получим выражение для средневзвешенного модуля деформации, исходя из известной степени армирования $A$. Для этого запишем определяющее его уравнение:

$$A = \frac{V_{эл}}{V}, \tag{1}$$

где $V_{эл}$ и $V$ — соответственно объем цементогрунтовых элементов и общий объем закрепляемого грунтового массива под подошвой фундамента, м$^3$.

Исходя из равномерного распределения цементогрунтовых элементов в закрепляемом массиве по глубине и по площади, можно считать, что в произвольном горизонтальном сечении, ограниченном площадью закрепляемого массива $F$, будет справедливо равенство:

$$A = \frac{V_{эл}}{V} = \frac{F_{эл}}{F}. \tag{2}$$

В этом случае площадь грунта $F_г$ в расчетной ячейке определится как разность общей площади ячейки $F$ и площади цементогрунтовых элементов $F_{эл}$:

$$F_г = F - F_{эл}. \tag{3}$$

Исходя из уравнений (1)–(3), получим систему:

$$\begin{cases} E_{\text{ср.взв}} = \frac{E_{\text{г}}\,(1-F_{\text{эл}}) + E_{\text{эл}}\,F_{\text{эл}}}{F}. \\ A = \frac{F_{\text{эл}}}{F}. \end{cases} \tag{4}$$

Для единичной площади $F = 1$ система (4) примет вид:

$$\begin{cases} E_{\text{ср.взв}} = E_{\text{г}}\,(1 - F_{\text{эл}}) + E_{\text{эл}}\,F_{\text{эл}} \\ A = F_{\text{эл}}. \end{cases}.$$

Следовательно, средневзвешенный модуль деформации закрепленного грунта $E_{\text{ср.взв}}$ для единичной площади закрепления $F = 1$ может быть выражен через модули деформации грунта $E_{\text{г}}$, элементов цементогрунта $E_{\text{эл}}$ и степень армирования $A$ в относительных единицах:

$$E_{\text{ср.взв}} = E_{\text{г}}\,(1 - \text{A}) + E_{\text{эл}}\,\text{A}. \tag{5}$$

Проведем численный эксперимент, используя уравнение (5), при этом будем изменять начальный модуль деформации грунта и степень армирования, оставляя неизменным модуль деформации элементов цементогрунта $E_{\text{эл}}$, предварительно задав его, исходя из рекомендаций ТСН-50-306–2005 (Приложение Ж).

Согласно указанным нормам модуль деформации цементогрунта $E_{\text{эл}}$ определяется, исходя из состава последнего, в частности процентного соотношения между цементом и другими компонентами инъецируемого раствора. Для расчета принимаем наихудшее значение $E_{\text{эл}}$ = 500 МПа, достигаемое при самом низком процентном содержании цемента $C_{\text{ц}}$ в изготавливаемом растворе. Для удобства использования зависимости $E_{\text{эл}} = f\,(C_{\text{ц}})$, по данным ТСН-50-306–2005 (Приложение Ж), построим ее график (рис. 1).

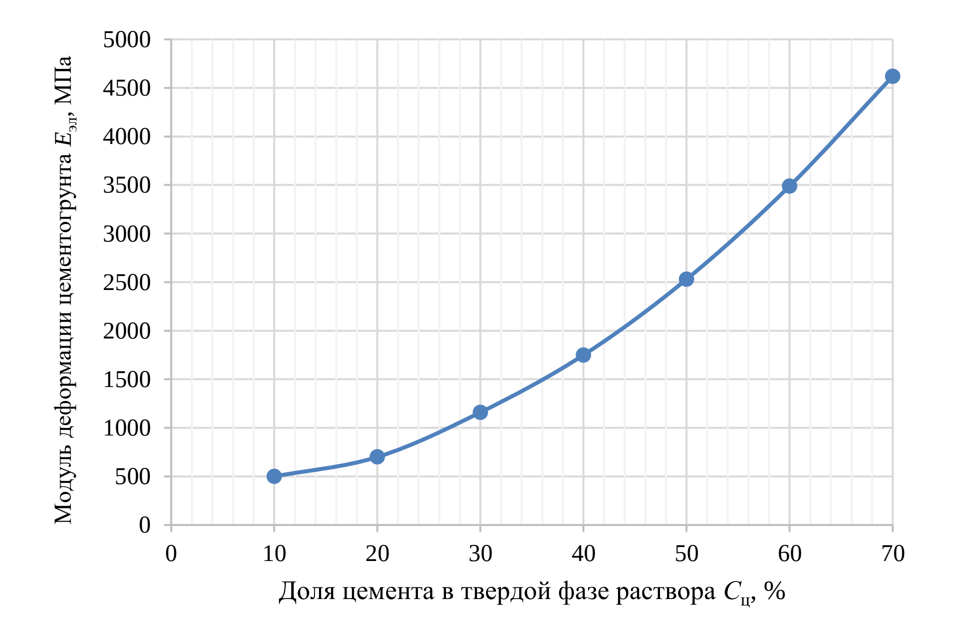



Рис. 1. График зависимости модуля деформации цементогрунта от содержания цемента в твердой фазе раствора (построен авторами по данным ТСН-50-306–2005)

Исходя из анализа инженерно-геологических условий Ростовской области и всего Юга России, а также результатов исследований авторов [5, 6, 8, 9, 12–14, 19], принимаем диапазон варьирования начального модуля деформации грунтов $E_{\text{г}}$ в пределах от 3 до 10 МПа.

Исходя из опыта закрепления просадочных грунтов [8, 9, 12–19], принимаем диапазон варьирования степени армирования $A$ в пределах от 0 до 16 %.

Результаты расчетов представлены в виде семейства графиков (рис. 2 *а*) и поверхности (рис. 2 *б*).

Как следует из результатов, приведенных на рис. 2, при расчете $E_{\text{ср.взв}}$ по нормам ТСН-50-306–2005 решающее значение имеет процент армирования $A$, от которого линейно зависит $E_{\text{ср.взв}}$, при этом количественные значения даже при минимальных процентах армирования $A$ = 6–7 %, применяемых в проектах закрепления грунтов, достигают 35–45 МПа, что не соответствует реальным значениям, достигаемым на практике и определяемым

штамповыми испытаниями или рассчитываемым косвенно по значениям осадок, наблюдаемых в процессе геотехничекого мониторинга. В случае же степени армирования $A$ = 10–12 % методика дает совсем некорректные результаты ($E_{\text{ср.взв}}$ = 55–70 Мпа), что соответствует полускальным и скальным грунтам), практически недостижимые ни на каких просадочных грунтах.

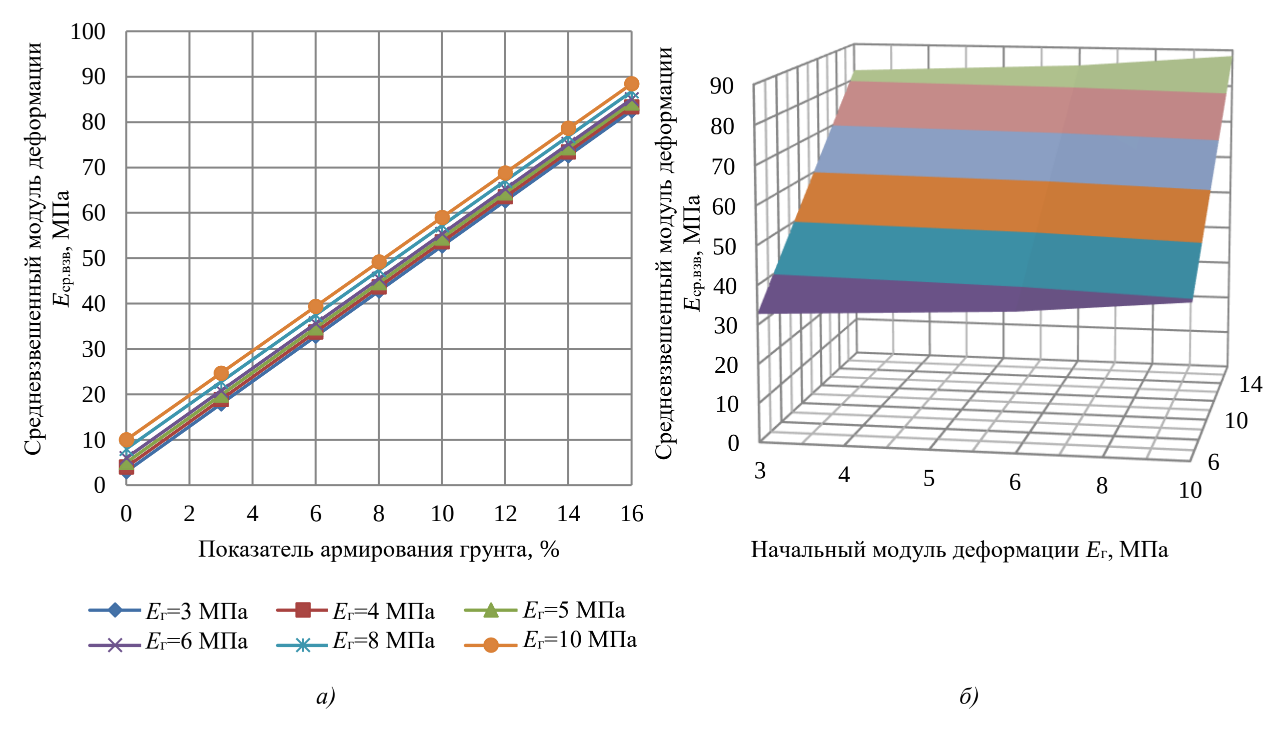



Рис. 2. Результаты расчета зависимости средневзвешенного модуля деформации $E_{\text{ср.взв}}$ закрепленного массива от степени армирования $A$ и начального модуля деформации грунта $E_г$ по нормам ТСН-50-306–2005:
*а* — в виде семейства графиков; *б* — в виде поверхности

Следует отметить, что расчеты выполнены для наихудшего модуля деформации грунтоцементных элементов (рис. 1). Фактически содержание цемента в инъецируемом растворе гораздо больше, поэтому результаты, полученные на рис. 2, будут еще более многократно завышены, тем самым могут приводить к неверным проектным решениям, в т. ч. технологическим, в части требуемого процента армирования $A$ и расхода цемента на заданный объем закрепляемого массива.

Причинами такого несоответствия расчетных значений модуля деформации массива закрепленного грунта, полученных по методике ТСН-50-306–2005, фактическому модулю, установленному нами на различных объектах по результатам штамповых испытаний и геотехнического мониторинга осадок зданий на закрепленном основании, являются:

– во-первых, завышенные значения модулей деформации самих грунтоцементных элементов, которые согласно ТСН-50-306–2005 (Приложение Ж) могут достигать 4620 МПа;

– во-вторых, неверный подход к расчету модуля деформации массива закрепленного грунта, заключающийся в определении средневзвешенного модуля $E_{\text{ср.взв}}$ между модулями грунтов $E_г$ и грунтоцементных элементов $E_{эл}$ и используемого затем для расчета осадки, что приводит к многократно заниженным значениям вертикальных деформаций.

Методика 2. Произведем расчет средневзвешенных модулей деформаций $E_{\text{ср.взв}}$, но в качестве модулей деформации элементов из цементогрунта примем не значения из ТСН-50-306–2005 (Приложение Ж), имеющего рекомендательный характер, а из ГОСТ Р 59706–2022 Грунты химически закрепленные. Технические условия, утвержденного и введенного в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 апреля 2022 г. № 82-ст.

Согласно ГОСТ Р 59706–2022 (таблица 1) элементы закрепленного грунта в зависимости от предела прочности на сжатие делятся на 8 классов: от С0,5 до С10, при этом модули деформации элементов грунта, закрепленных растворами на основе цемента, линейно зависят от предела прочности на сжатие (рис. 3).




Рис. 3. График зависимости модуля деформации закрепленного грунта от его предела прочности на сжатие (построен авторами по данным ГОСТ Р 59706–2022)

Согласно ГОСТ Р 59706–2022 (таблица 2) нормируемая прочность на сжатие грунта, закрепленного инъецированием цементных растворов, в грунтах с коэффициентом фильтрации от 0,5 до 10 м/сут должна составлять не менее 0,5 МПа.

По графику (рис. 4) определяем, что для закрепленного грунта с такой прочностью на сжатие модуль деформации составляет 50 МПа, что на порядок ниже значения, рекомендуемого ТСН-50-306–2005 (Приложение Ж) для наименьшего по содержанию цемента инъецируемого раствора.

Проведем аналогичный численный эксперимент по определению средневзвешенного модуля деформации $E_{ср.взв}$ так же, как и по ТСН-50-306–2005, но при условии, что модуль деформации элементов из цеметогрунта определен как для минимально допустимого по прочности на сжатие в соответствии с ГОСТ Р 59706–2022.

Результаты расчетов аналогично представлены в виде семейства графиков (рис. 4 *а*) и поверхности (рис. 4 *б*).

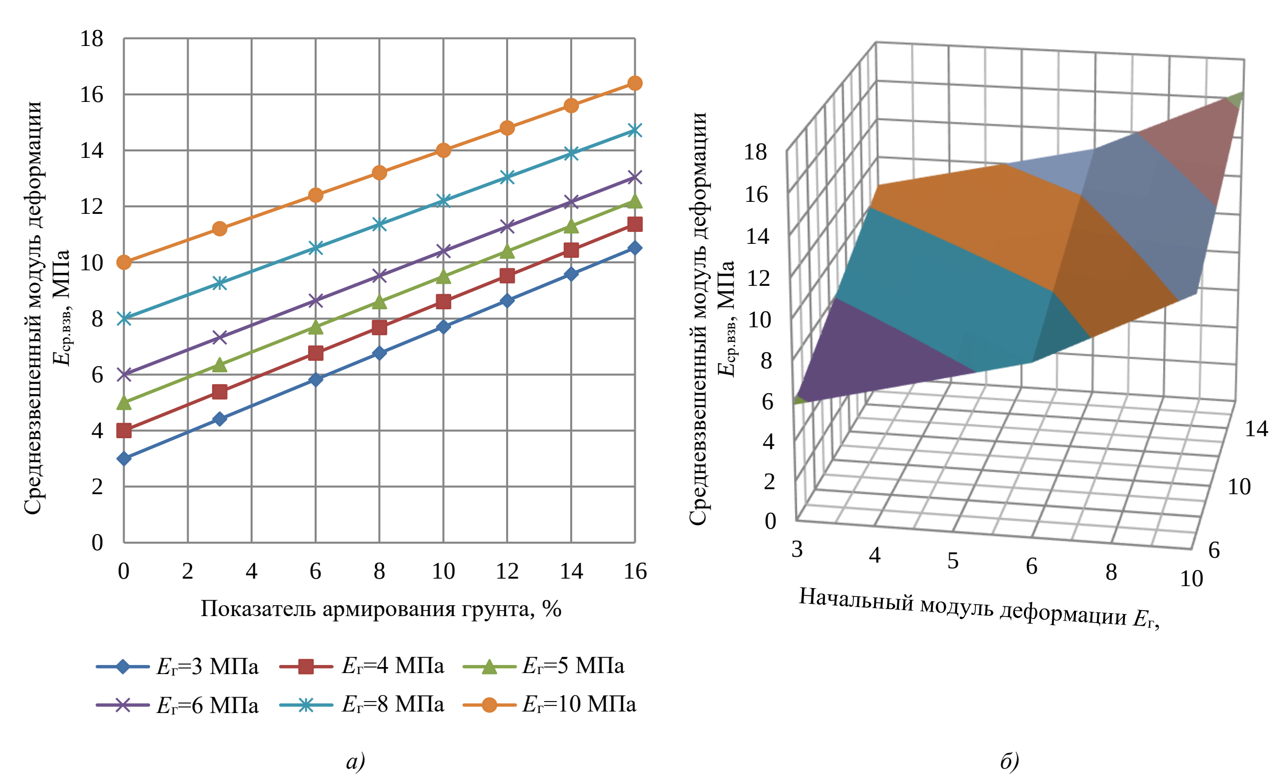



Рис. 4. Результаты расчета зависимости средневзвешенного модуля деформации $E_{ср.взв}$ закрепленного массива от степени армирования $A$ и начального модуля деформации грунта $E_г$ по нормам ГОСТ Р 59766–2022:
*а* — в виде семейства графиков; *б* — в виде поверхности

Результаты, приведенные на рис. 4 *а, б* для минимально возможных по прочности на сжатие цементогрунтовых элементов по ГОСТ Р 59706–2022, существенно отличаются от аналогичных данных, рассчитанных в соответствии с рекомендациями ТСН-50-306–2005 (рис. 2 *а, б*).

Исходя из опыта проектирования закрепленных оснований, непосредственного выполнения работ по закреплению методом цементации, контроля качества закрепления грунтовых массивов, геотехнического мониторинга вертикальных деформаций зданий и сооружений на просадочных грунтах, можно сделать вывод о том, что результаты, приведенные на рис. 4 *а, б*, являются более адекватными и близкими к реальным значениям модулей деформации закрепленных массивов, получаемым на практике.

Если аналогичные расчеты выполнять не для минимально допустимых ГОСТ Р 59706–2022 по прочности инъецируемых растворов (0,5 МПа), например, 1,0–1,5 МПа, то будут получены большие значения модулей деформации закрепленных грунтовых массивов — в пределах 18–25 МПа, что чаще всего и закладывается в проекты закрепления просадочных оснований.

Методика 3 (авторская). Для сопоставления полученных расчетных значений модуля деформации закрепленного грунтового массива, исходя из рекомендаций ТСН-50-306–2005 и требований ГОСТ Р 59706–2022, с фактическими значениями модулей деформации, получаемыми на практике, авторами был выполнен ряд экспериментов и наблюдений в рамках геотехнического мониторинга деформаций зданий и сооружений на закрепленных грунтах.

Экспериментально модуль деформации закрепленных грунтов определялся штамповыми испытаниями с помощью специально разработанного запатентованного устройства[1], подробно описанного нами в работе [19].

Достоинством указанного устройства является его большая площадь (около 6 м$^2$), что позволяет исключить погрешности измерения, связанные с неравномерным распределением грунтоцементных элементов в закрепляемом массиве, и получить усредненное значение модуля деформации по аналогии с расчетом некоего средневзвешенного модуля деформации, расчеты которого по методике ТСН-50-306–2005 и нормам ГОСТ Р 59706–2022 приведены выше.

Предлагаемый метод определения модуля деформации закреплённого грунтового массива позволяет отказаться от расчета средневзвешенного значения модуля, а также использовать зависимости, полученные по результатам непосредственных испытаний закрепленных грунтов при различных начальных модулях деформации просадочных грунтов и разной степени (проценте) армирования массива цементогрунтовыми элементами. Кроме того, для статистической обработки результатов были использованы значения модулей деформации закрепленных грунтовых массивов, полученные расчетным путем, исходя из замера осадок построенных зданий в ходе геотехнического мониторинга.

**Результаты исследования.** В таблице 1 сведены результаты расчета модуля деформации закрепленного грунтового массива, полученные по результатам штамповых испытаний на нескольких объектах, а также по результатам геотехнического мониторинга осадок зданий, построенных в г. Ростове-на-Дону и г. Волгодонске на грунтовых основаниях, закрепленных методом армирования цементно-песчаным раствором.

Таблица 1

Сводная таблица результатов расчета модуля деформации закрепленного грунта по экспериментальным данным штамповых испытаний и геотехнического мониторинга

| Степень армирования грунта $A$, % | Модуль деформации закрепленного грунта $E_R$, МПа, при начальном модуле деформации просадочного грунта $E_0$, МПа | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 10 |
| 6 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 15 |
| 8 | 9 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 |
| 10 | 10 | 12 | 16 | 18 | 19 | 20 |
| 12 | 12 | 15 | 18 | 19 | 20 | 21 |
| 14 | 14 | 17 | 19 | 20 | 21 | 22 |
| 16 | 15 | 18 | 20 | 21 | 22 | 22 |

На основании проведенных испытаний и сбора данных геотехнического мониторинга по данным таблицы 1 были построены графики зависимости модуля деформации закрепленного грунта $E_R$, МПа, от процента армирования $A$, %, для различных значений начального модуля общей деформации в водонасыщенном состоянии $E_0$, который для инженерно-геологических условий Ростовской области варьируется от 3 до 10 МПа (рис. 5).



[1] Сычев И.В., Таржиманов М.А. *Устройство для испытания грунтов, армированных цементно-песчаным раствором.* Патент на полезную модель РФ, № 2015146063/03. 2016.

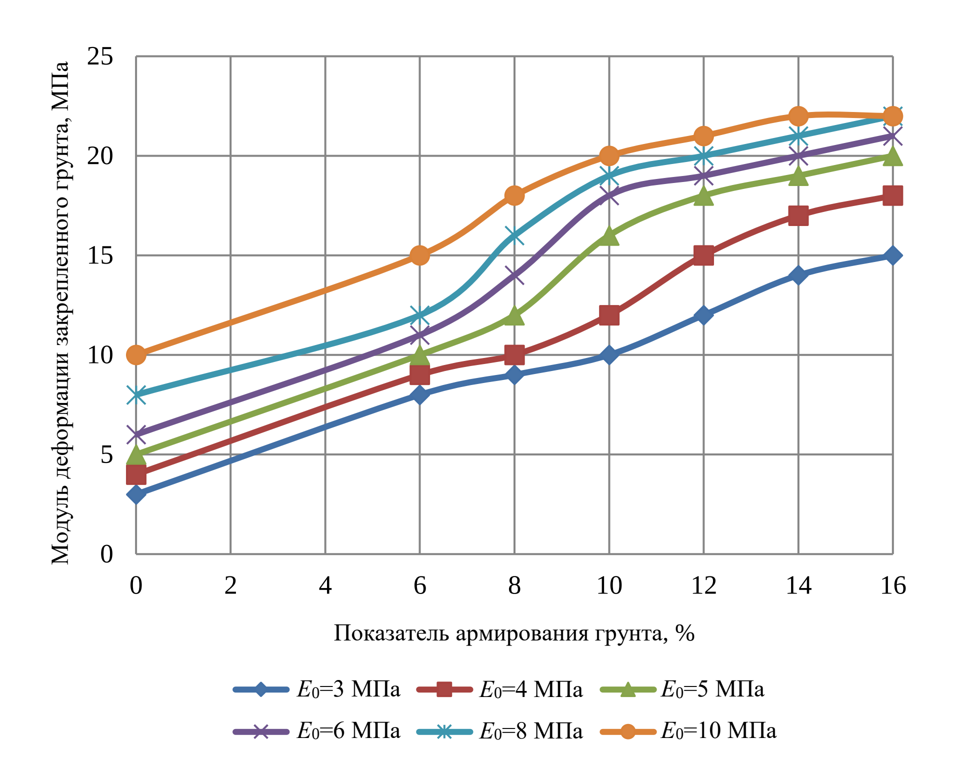



Рис. 5. Графики зависимости модуля деформации закрепленного грунтового массива от показателя армирования грунтов при различных начальных модулях деформации (построены авторами по собственным экспериментальным данным и результатам геотехнического мониторинга)

Для определения вида множественной корреляции и вида функции $E_R = f(E_0; A)$ построим поле корреляции в виде поверхности (рис. 6).

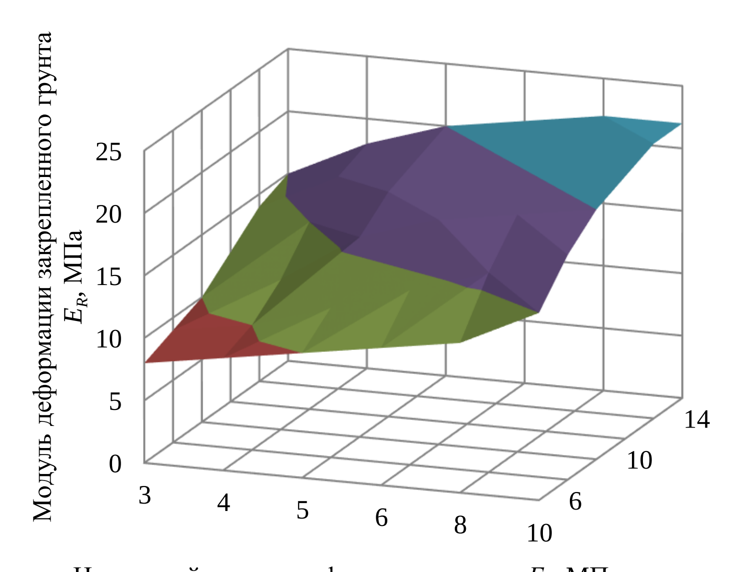



Рис. 6. Поле корреляции для установления вида зависимости $E_R = f(E_0; A)$

Как следует из графиков, приведенных на рис. 5 и 6, между исследуемыми параметрами имеется нелинейная корреляционная связь, при этом нелинейность наблюдается при проценте армирования от 8 до 16 %, максимальное приращение модуля деформации грунта отмечается при увеличении процента армирования от 8 до 12 % с последующим уменьшением скорости роста. Этот эффект объясняется тем, что при повышении процента армирования уменьшается количество пор, тем самым повышается модуль деформации, а при определенном насыщении грунта раствором снижение пористости происходит значительно медленнее, соответственно наблюдается более медленный рост модуля деформации.

При проценте армирования $A$ = 16 % модуль закрепленного грунта $E_R$ достигает от 15 до 22 МПа в зависимости от исходного модуля деформации, чего достаточно для большинства зданий и сооружений, проектируемых на ленточных или плитных фундаментах на искусственном основании. Увеличение процента армирования $A$ свыше 16 % технически и экономически нецелесообразно. Здания, требующие по расчету большего модуля деформации закрепленного грунта по условиям ограничения максимальной осадки, целесообразно проектировать на свайном основании или применять другие методы ликвидации просадочных грунтов и повышения их деформационных характеристик.

По виду криволинейной поверхности (рис. 6) можно сделать вывод о том, что зависимость $E_R = f(E_0; A)$ можно описать уравнением поверхности 2-го порядка общего вида:

$$E_R = aA^2 + bE_0^2 + cAE_0 + dA + eE_0 + f,$$

где $a, b, c, d, e, f$ — неизвестные коэффициенты аппроксимации.

С помощью метода наименьших квадратов (МНК) найдем значения коэффициентов:

$$a = 2{,}552; b = -0{,}148; c = -9{,}67 \cdot 10^{-5}; d = 0{,}863; e = 3{,}043; f = -5{,}973.$$

С учетом ничтожности третьего слагаемого, которое не влияет на итоговый результат, уравнение зависимости $E_R = f(E_0; A)$ с достаточной точностью может быть записано в виде:

$$E_R = 2{,}552 \cdot 10^{-3}A^2 - 0{,}148E_0^2 + 0{,}863A + 3{,}043E_0 - 5{,}973,$$

где $E_R$ — модуль деформации закрепленного грунта, МПа; $E_0$ — модуль деформации исходного грунта, МПа; $A$ — процент армирования грунта цементным (цементно-песчаным) раствором, %.

Оценка точности полученного уравнения показывает, что среднее относительное отклонение между теоретическими значениями и экспериментальными данными, полученными по 42 результатам испытаний, составляет 8,5 %, а корреляционное отношение близко к 1. Это свидетельствует о достоверности полученного уравнения.

**Обсуждение и заключение.** По результатам исследования сделаны следующие выводы:

1. Используемый многими проектировщиками Ростовской области подход к проектированию закрепления просадочных грунтов основан на рекомендациях ТСН-50-306–2005 Ростовской области. Основания и фундаменты повышенной несущей способности, которые предусматривают расчет средневзвешенного модуля деформации закрепленного массива, исходя из соотношения площадей и модулей деформации грунтов и армирующих цементогрунтовых элементов.

2. ТСН-50-306–2005 (Приложение Ж) дают рекомендации по значениям расчетного модуля деформации цементогрунтовых элементов, который зависит от компонентного состава инъецируемого раствора (доли цемента в общей твердой фазе раствора) и находится в пределах от 500 до 4620 МПа.

3. Проведенный численный эксперимент свидетельствует о том, что использование методики ТСН-50-306–2005 применительно к проектированию цементации грунтов даже при минимальном значении модуля деформации цементогрунтовых элементов (500 МПа) и наиболее распространенных значениях показателя армирования $A$ (от 6 до 16 %), принимаемых в проектах закрепления в Ростовской области, приводит к тому, что средневзвешенный модуль деформации закреплённого массива достигает:

– $E_{\text{ср.взв}}$ = 35–45 МПа при $A$ = 6–7 % (минимальные показатели армирования);

– $E_{\text{ср.взв}}$ = 55–70 МПа при $A$ = 10–12 % (средние показатели армирования);

– $E_{\text{ср.взв}}$ = 75–90 МПа при $A$ = 14–16 % (максимальные показатели армирования), что не соответствует реальным значениям, достигаемым на практике и определяемым штамповыми испытаниями или рассчитываемым косвенно по значениям осадок, наблюдаемых в процессе геотехничекого мониторинга.

4. Причинами такого несоответствия расчетных значений модуля деформации массива закрепленного грунта, полученных по методике ТСН-50-306–2005, фактическому модулю, установленному по результатам штамповых испытаний и геотехнического мониторинга осадок зданий на закрепленном основании, являются:

– завышенные значения модулей деформации самих грунтоцементных элементов, которые согласно ТСН-50-306–2005 (Приложение Ж) могут достигать 4620 МПа;

– неверный подход к расчету модуля деформации массива закрепленного грунта, заключающийся в определении средневзвешенного модуля $E_{\text{ср.взв}}$ между модулями грунтов $E_{\text{г}}$ и грунтоцементных элементов $E_{\text{эл}}$ и используемого затем для расчета осадки, что приводит к многократно заниженным значениям вертикальных деформаций и ошибкам при проектировании.

5. Более адекватные результаты средневзвешенного модуля деформации закрепленного массива были получены в результате численного эксперимента с использованием минимальных требований к закрепленным грунтам в соответствии с недавно утвержденным ГОСТ Р 59766–2022. Согласно указанному ГОСТ модуль деформации элементов закрепленного грунта линейно зависит от его предела прочности на сжатие, которое находится в пределах от 50 до 1000 МПа соответственно для классов закрепленных грунтов от С0,5 до С10.

6. По результатам расчетов средневзвешенного модуля деформации для достижения минимально допустимого ГОСТ Р 59706–2022 класса С0,5, получены значения до 8–16 МПа в зависимости от степени армирования *A*, что неплохо коррелирует с результатами фактических модулей, достигаемых на практике. При повышении класса грунтов до С1 – С1,5 средневзвешенный модуль деформации повышается до 18–26 МПа при средних значениях процента армирования (*A* = 8–12 %). Таким образом, методика оценки модуля деформации закрепленного грунтового массива, основанная на определении средневзвешенного значения $E_{ср.взв}$, дает адекватные результаты для наиболее распространенных значений *A* при модуле деформации цементогрунтовых элементов в пределах 50–150 МПа.

7. Разработанное и запатентованное устройство с увеличенной площадью штампа, соизмеримой с площадью подошвы реальных столбчатых и ленточных фундаментов, позволяет наиболее адекватно и достоверно оценить модуль деформации грунтового основания после закрепления методом цементации, при этом конструкция стенда позволяет исследовать влияние процента армирования грунта на модуль деформации закрепленного грунта как при природной влажности, так и водонасыщенном состоянии (при $S_r > 0{,}8$).

8. Успешная промышленная апробация экспериментального стенда проведена при закреплении грунтов на объектах строительства и реконструкции в г. Ростове-на-Дону и показала высокую точность и надежность результатов измерения деформационных характеристик грунтового массива, закрепленного методом цементации.

9. В результате проведенных экспериментальных исследований, а также с учетом результатов геотехнического мониторинга осадок задний, построенных на закрепленных грунтовых основаниях в г. Ростове-на-Дону и г. Волгодонске, установлена нелинейная зависимость модуля деформации закрепленного грунтового основания $E_R$ от процента армирования *A* и начального модуля деформации $E_0$, которая с высокой точностью и достоверностью описывается уравнением поверхности 2-го порядка общего вида. Среднее относительное отклонение теоретических и экспериментальных данных составляет 8,5 %, а корреляционное отношение близко к 1, что свидетельствует о высокой точности полученного уравнения.

**Список литературы**

1. Осипов В.И., Аникеев А.В., Бурова В.Н., Козлякова И.В., Постоев Г.П., Еремина О.Н. и др. *Геологический риск урбанизированных территорий*. Монография. Москва: РУДН; 2020. 312 с.

2. Осипов В.И., Карпенко Ф.С., Румянцева Н.А. Активная пористость и ее влияние на физико-механические свойства глинистых грунтов. *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. 2014;(3):262–269. URL: https://naukarus.com/aktivnaya-poristost-i-ee-vliyanie-na-fiziko-mehanicheskie-svoystva-glinistyh-gruntov (дата обращения: 12.06.2023).

3. Osipov VI. Density of clay minerals. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2012;48(6):231–240. https://doi.org/10.1007/s11204-012-9153-0

4. Трофимов В.Т. Опыт создания системы буронабивных грунтовых свай как эффективный метод глубинного укрепления массива просадочных лессовых грунтов. *Инженерная геология*. 2018;13(4–5):120–122.

5. Ананьев ВП. Лёссовые породы и инженерная геология. *Известия Ростовского государственного строительного университета*. 2011;(15):36–40.

6. Ананьев В.П., Потапов А.Д., Филькин Н.А. *Специальная инженерная геология*. Москва: ИНФРА-М; 2016. 263 с.

7. Мангушев Р.А., Осокин А.И., Усманов Р.А. *Устройство и реконструкция оснований и фундаментов на слабых и структурно-неустойчивых грунтах*. Монография. Санкт Петербург: Лань; 2021. 460 с. URL: https://reader.lanbook.com/book/171863?demoKey=167bac60ad16c29a83a26c6b02ef6ff5#2 (дата обращения: 12.06.2023).

8. Галай Б.Ф., Сербин В.В., Галай О.Б. Опыт уплотнения просадочных грунтов на Северном Кавказе. *Геотехника*. 2018;10(5–6):42–50. URL: https://www.geomark.ru/articles/opyt-uplotneniya-prosadochnykh-gruntov/ (дата обращения: 12.06.2023).

9. Черкасов С.М. Расчет величины деформаций лессовых просадочных грунтов от собственного веса и сравнение с результатами опытных работ. *Научное обозрение*. 2014;11(3):746–749.

10. Dolzhikov P., Prokopov A., Akopyan V. Foundation Deformations Modeling in Underworking and Hydroactivated Rocks. In*: Proceedings of the International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017. Series: Advances in Intelligent Systems and Computing*. Cham: Springer Publ.; 2018. P. 647–654. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1_69

11. Akopyan V, Akopyan A. Experimental and Theoretical Investigation of the Interaction of the Reinforced Concrete Screw Piles with the Surrounding Soil. In*: 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016). Series: Procedia Engineering*. Amsterdam: Elsevier Publ.; 2016. P. 2202–2207.

12. Жур В.Н., Александров А.П., Куликов А.С. Анализ просадочных процессов при компрессионном сжатии глинистых грунтов Ростовской области и Республики Калмыкия. *Инженерный вестник Дона*. 2021;73(1). URL: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2021/6801 (дата обращения: 12.06.2023).

13. Прокопова М.В., Прокопов А.Ю., Жур В.Н. Усиление просадочных грунтов под существующей застройкой г. Ростова-на-Дону. *Труды Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2016;(4):79–87.

14. Прокопова М.В., Прокопов А.Ю., Жур В.Н. Исследование свойств лессовых просадочных грунтов Восточного Донбасса. В: *Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство».* Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения; 2017. С. 354–358.

15. Prokopov A., Zhur V., Medvedev A. Application of the Cartographic Method of Research for the Detection of the Dangerous Zones of Mining Industrial Territories. In: *Proceedings of the 27th Russian-Polish-Slovak Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering. MATEC Web of Conferences*. 2018;196:03009. https://doi.org/10.1051/matecconf/201819603009

16. Гиря Л.В., Белаш В.В., Хоренков С.В., Петров К.С. Контроль качества производства работ по закреплению грунтов основания с использованием метода георадиолокационного подповерхностного зондирования. *Инженерный вестник Дона.* 2013;27(4). URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2056 (дата обращения: 12.06.2023).

17. Гапонов Д.А., Фоменко Л.Н., Шеремет Р.Д. Применение георадара для контроля качества закрепления грунтов. *Инженерный вестник Дона*. 2016;42(3). URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3724 (дата обращения: 12.06.2023).

18. Prokopov A., Prokopova M., Rubtsova Ya. The Experience of Strengthening Subsidence of the Soil under the Existing Building in the City of Rostov-on-Don. In: *Proceedings of the International Science Conference “Smart City” (SPBWOSCE 2016). MATEC Web of Conferences*. St. Petersburg: EDP Sciences Publ.; 2017. P. 02001. https://doi.org/10.1051/matecconf/201710602001

19. Прокопов А.Ю., Сычев И.В. Определение деформационных характеристик грунтового массива, преобразованного по технологии армирования грунта цементно-песчаным раствором. *Инженерный вестник Дона*. 2019;54(3). URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2019/5809 (дата обращения: 12.06.2023).

**References**

1. Osipov VI, Anikeev AV, Burova VN, Kozlyakova IV, Postoev GP, Eremina ON, et al. *Geologicheskii risk urbanizirovannykh territorii.* Monograph. Moscow: RUDN University Publ.; 2020. 312 p. (In Russ.).

2. Osipov VI, Karpenko FS, Rumyantseva NA. Active Porosity and its Influence on Physico-Mechanical Properties of Clay. *Geoekologiya. Inzhenernaya Geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*. 2014;(3):262–269. (In Russ.). URL: https://nau-karus.com/aktivnaya-poristost-i-ee-vliyanie-na-fiziko-mehanicheskie-svoystva-glinistyh-gruntov (accessed: 12.06.2023).

3. Osipov VI. Density of clay minerals. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2012;48(6):231–240. https://doi.org/10.1007/s11204-012-9153-0

4. Trofimov VT. The Experience of Bored Ground Piles System Creation as an Effective Method of Deep Strengthening of Subsidence Loess Soils Massif. *Engineering Geology World*. 2018;13(4–5):120–122. (In Russ.).

5. Anan'ev VP. Lessovye porody i inzhenernaya geologiya. *Izvestiya Rostovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta*. 2011;(15):36-40. (In Russ.)

6. Anan'ev VP, Potapov AD, Fil'kin NA. *Special Engineering Geology*. Moscow: INFRA-M Publ.; 2016. 263 p. (In Russ.).

7. Mangushev RA, Osokin AI, Usmanov RA. *Ustroistvo i Rekonstruktsiya Osnovanii i Fundamentov na Slabykh i Strukturno-Neustoichivykh Gruntakh.* Monograph. Saint Petersburg: Lan' Publ.; 2021. 460 p. (In Russ.). URL: https://reader.lanbook.com/book/171863?demoKey=167bac60ad16c29a83a26c6b02ef6ff5#2 (accessed: 12.06.2023).

8. Galai BF, Serbin VV, Galai OB. Collapsing Soil Compaction Experience in North Caucasus. *Geotechnics*. 2018;10(5–6):42–50. URL: https://www.geomark.ru/articles/opyt-uplotneniya-prosadochnykh-gruntov (In Russ.).

9. Cherkasov SM. Calculation of the Amount of Deformation of Loess Subsiding Soils under Own Weight and Its Comparison With Experimental Work Results. *Nauchnoe obozrenie*. 2014;11(3):746–749. (In Russ.).

10. Dolzhikov P, Prokopov A, Akopyan V. Foundation Deformations Modeling in Underworking and Hydroactivated Rocks. In: *Proceedings of the International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017. Series: Advances in Intelligent Systems and Computing*. Cham: Springer Publ.; 2018. P. 647–654. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1_69

11. Akopyan V, Akopyan A. Experimental and Theoretical Investigation of the Interaction of the Reinforced Concrete Screw Piles with the Surrounding Soil. In: *2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016). Series: Procedia Engineering.* Amsterdam: Elsevier Publ.; 2016. 150. P. 2202–2207.

12. Zhur VN, Aleksandrov AP, Kulikov AS. Analysis of Subsidence Processes During Compression Compression of Clay Soils in the Rostov Region and the Republic of Kalmykia. *Engineering Journal of Don.* 2021;73(1):260-270. (In Russ.). URL: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2021/6801 (accessed:12.06.2023).

13. Prokopova MV, Prokopov AYu, Zhur VN. Usilenie prosadochnykh gruntov pod sushchestvuyushchei zastroi-koi g. Rostova-na-Donu. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*. 2016;(4):79–87. (In Russ.).

14. Prokopova MV, Prokopov AYu, Zhur VN. Investigation of the Properties of Less Surface Grounds of the Eastern Donbass. In: *Proceedings of the International Science and Practical Conference "Transport: Science, Education, Production"*. Rostov-on-Don: Rostov State Transport University; 2017. P. 354–358. (In Russ.).

15. Prokopov A, Zhur V, Medvedev A. Application of the Cartographic Method of Research for the Detection of the Dangerous Zones of Mining Industrial Territories. In: *Proceedings of the 27th Russian-Polish-Slovak Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering. MATEC Web of Conferences*. 2018;196:03009. https://doi.org/10.1051/matecconf/201819603009

16. Girya LV, Belash VV, Khorenkov SV, Petrov KS. Quality Control of the Production Work on the Consolidation of Soil Foundation Using the GPR Subsurface Sensing. *Engineering Journal of Don*. 2013;27(4). (In Russ.). URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2056 (accessed: 12.06.2023).

17. Gaponov DA, Fomenko LN, Sheremet RD. The Use of Georadar in Quality Control of Soil Stabilization. (In Russ.). URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3724 *Engineering Journal of Don.* 2016;42(3). (accessed: 12.06.2023).

18. Prokopov A, Prokopova M, Rubtsova Ya. The Experience of Strengthening Subsidence of the Soil under the Existing Building in the City of Rostov-on-Don. In: *Proceedings of the International Science Conference "Smart City" (SPBWOSCE 2016). MATEC Web of Conferences*. St. Petersburg: EDP Sciences Publ.; 2017. P. 02001. https://doi.org/10.1051/matecconf/201710602001

19. Prokopov A.Yu, Sychev IV. Determination of the Deformation Characteristics of the Soil Massif, Transformed According to the Technology of Soil Reinforcement with Cement-sand Mortar. *Engineering Journal of Don*. 2019;54(3). (In Russ.). URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/N3y2019/5809 (accessed: 12.06.2023).

**Поступила в редакцию** 28.07.2023
**Поступила после рецензирования** 05.08.2023
**Принята к публикации** 19.08.2023

*Об авторах:*

**Прокопов Альберт Юрьевич,** заведующий кафедрой «Инженерная геология, основания и фундаменты» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ScopusID, ResearcherID, ORCID, prokopov72@rambler.ru.

**Сычев Илья Владимирович,** старший преподаватель кафедры «Инженерная геология, основания и фундаменты» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ScopusID, ResearcherID, ORCID, ilya.sychev88@gmail.com.

**Рязанцева Анастасия Владимировна,** магистрант кафедры «Инженерная геология, основания и фундаменты» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ORCID, anastasiya.razinkova@mail.ru.

*Заявленный вклад соавторов:*

А.Ю. Прокопов — формирование основной концепции, анализ нормативных методик в области проектирования, строительства и эксплуатации зданий на просадочных грунтах, постановка и проведение численного эксперимента, обработка результатов полевых испытаний, формулировка выводов.

И.В. Сычев — разработка экспериментального устройства для нагнетания раствора, контроля качества закрепления грунтов и измерения модуля деформации закрепленного массива, проведение штамповых испытаний закрепленных грунтов, геотехнический мониторинг осадок зданий на закрепленных грунтах, расчет модулей деформации по результатам экспериментов и мониторинга.

А.В. Рязанцева — обзор источников литературы, оформление графических материалов для статьи.

*Конфликт интересов:* авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Received** 28.07.2023
**Revised** 05.08.2023
**Accepted** 19.08.2023

*About the Authors:*

**Albert Yu. Prokopov**, Dr.Sci.(Engineering), Professor, Head of the Engineering Geology, Bases and Foundations Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ScopusID, ResearcherID, ORCID, prokopov72@rambler.ru.

**Ilya V. Sychev**, Senior Lecturer of the Engineering Geology, Bases and Foundations Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ScopusID, ResearcherID, ORCID, ilya.sychev88@gmail.com

**Anastasiya V. Ryazantseva,** Master Student of the Engineering Geology, Bases and Foundations Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, anastasiya.razinkova@mail.ru.

*Claimed contributorship:*

AYu Prokopov — formulating the main concept, analysis of the normative methodology referring to the buildings design, construction and operation on the subsiding soils, setting up and conducting the numerical experiment, processing the results of field tests, formulating the conclusions.

IV Sychev — designing the experimental device for mortar injection, quality control of soil stabilisation and the stabilised soil mass deformation modulus measurement, carrying out the plate load tests of the stabilised soils, geotechnical monitoring of the buildings subsidence on the stabilised soils, calculating the deformation moduli according to the experiment and monitoring results.

AV Ryazantseva — review of literature sources, article graphic materials design.

*Conflict of interest statement:* the authors do not have any conflict of interest.

*All authors have read and approved the final manuscript.*